



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 3265

(13) U

(51) 7 G01C9/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС

ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) СПОСІБ НАСТРОЮВАННЯ ІНКЛІНОМЕТРА

1

2

(21) 2003077235

(22) 31.07.2003

(24) 15.11.2004

(46) 15.11.2004, Бюл. №11, 2004р.

(72) Шаров Сергій Анатолієвич, Горащенко Ната-
лія Володимирівна, Кротов Вадим Володимиро-
вич, Смирнов Сергій Ратмирович, Прушко Віктор
Романович, Яцун Леонід Васильович(73) ВІДКРИТЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО "ДО-
СЛІДНО-КОНСТРУКТОРСЬКЕ БЮРО ГЕОФІЗИЧ-
НОГО ПРИЛАДОБУДУВАННЯ"(57) Спосіб настроювання інклінометра, що вклю-
чає встановлення інклінометра уздовж заданих
напрямків у робочому діапазоні температур, ви-
значення параметрів невиваженості осей чутли-
вості первинних вимірників, вимірювання проекцій
в осях чутливості первинних вимірників, обчислен-
ня проекцій в осях системи координат інкліномет-
ра, який відрізняється тим, що інклінометр віссю
симетрії встановлюють уздовж довільних, але за-
здалегідь вибраних напрямків, число яких не мен-
ше двох, і послідовно задають вимірювальні по-
ложення шляхом обертання приладу навколо осі
симетрії на фіксовані кути з числом різних значень
кутів повороту не менше двох на кожному напрям-
ку, параметри ж невиваженості осей чутливості

визначають разом з каліброваними параметрами
чутливих елементів і параметрами впливу магніт-
них полів-перешкод і взаємного впливу первинних
вимірників магнітного поля, встановлюють послі-
довно інклінометр віссю симетрії уздовж довільно
заданих двох напрямків, визначають зміну розра-
хункових значень в осях системи координат інклі-
нометра в робочому діапазоні температур, а проє-
кції u_i ($i = x, y, z$) вектора прискорення сили тяжіння
і вектора напруженості магнітного поля обчислю-
ють в осях системи координат інклінометра по
вимірах U_x, U_y, U_z в осях чутливості первинних
вимірників і температури t усередині інклінометра
 $u_i = K(t)\tilde{u}_i + u_{i0}(t)$,

де:

$K(t), u_{i0}(t)$ - масштабний коефіцієнт і постійна
складова розрахункових значень для поточної
температури,

$$\tilde{u}_i = k_{i1}U_x + k_{i2}U_y + k_{i3}U_z + k_{i0}$$

де:

$k_{i0}, k_{i1}, k_{i2}, k_{i3}$ - параметри, знайдені при темпера-
турі настроювання інклінометра.

Корисна модель відноситься до точного при-
ладобудування і може бути використана в інкліно-
метрії, у навігаційних системах, тобто в таких при-
строях, де застосовуються трикомпонентні
вимірники прискорення сили тяжіння і трикомпо-
нентні вимірники вектора напруженості магнітного
поля.

Магнітний інклінометр [1], заснований на три-
компонентному вимірнику вектора прискорення
сили тяжіння і трикомпонентному вимірнику векто-
ра напруженості магнітного поля, призначений для
виміру проекцій зазначених векторів на осі систе-
ми координат, зв'язаної з корпусом приладу. По
обмірюваних проекціях відповідно до відомих ал-
горитмів [1] розраховуються кути орієнтації сверд-
ловини, оскільки корпус приладу стикається з її
внутрішньою поверхнею під час вимірів. Точність

визначення кутів орієнтації прямо пов'язана з точ-
ністю виміру проекцій векторів.

Відомі способи настроювання інклінометрів [1],
що включають припасування посадкових місць
первинних вимірників, попереднє калібрування
кожного первинного вимірника, складання інкліно-
метра, установлення інклінометра в задані напря-
мки з метою контролю й атестації приладу. При
перевищенні похибки заданого діапазону проце-
дуру повторюють.

Недоліком способів є значна трудомісткість
процесу настроювання і відсутність рекомендацій
з усунення похибок у вихідних значеннях триком-
понентних вимірників інклінометра.

Найбільш близьким до корисної моделі є спо-
сіб настроювання інклінометра, викладений в опи-
сі винаходу до патенту Російської Федерації

(13) U

(11) 3265

(19) UA

№2085852, кл. G01C25/00, 9/00, 1997 [2], відповідно до якого виконують послідовне установлення кожної осі системи координат, пов'язаної з інклінометром, спочатку уздовж одного вимірюваного вектора, а потім уздовж другого вимірюваного вектора, визначають параметри невиваженості осей чутливості первинних вимірників, вимірюють проекції в осях чутливості первинних вимірників, обчислюють проекції в осях системи координат інклінометра з урахуванням виправлень, що усувають похибки, викликані перекосами осей чутливості первинних вимірників.

Недоліком такого способу є обов'язкова наявність попереднього калібрування осей чутливості для усунення розходжень у коефіцієнтах передачі первинних вимірників, попередньої додаткової перевірки відсутності взаємного впливу (відсутність зв'язків, кореляцій) між вимірювальними осями, неврахування постійних складових у вихідних сигналах первинних вимірників (незалежних від орієнтації осі чутливості) і зміни коефіцієнтів передачі перетворювачів у робочому діапазоні температур.

Мета корисної моделі - спрощення процесу настроювання і підвищення точності інклінометра за рахунок усунення помилок у вихідних сигналах, викликаних:

- нерівністю коефіцієнтів передачі і наявністю електричних нульових зміщень у вихідних сигналах первинних вимірників;
- перекосами осей чутливості первинних вимірників щодо осей системи координат інклінометра;
- дією постійних магнітних полів-перешкод в зоні установлення перетворювачів магнітного поля;
- перехресними зв'язками між перетворювачами магнітного поля;
- зміною коефіцієнтів передачі і дрейфом нулів по каналах у робочому діапазоні температур експлуатації приладу.

Пропонований спосіб настроювання інклінометра припускає деякі умови:

- настроювання приладу виконується в приміщенні, де відсутні магнітні поля-перешкоди, а температура в приміщенні вважається незмінною протягом настроювання приладу;
- температура в приміщенні, при якій виконується настроювання приладу, входить у діапазон робочих температур інклінометра;
- передбачається наявність похило-поворотного столу з можливістю установлення й утримання інклінометра в будь-якому довільному куті вертикалі й під апсидальним кутом;
- точність задання кутів установлення приладу вища, ніж вимоги по точності виміру кутів приладом;
- у процесі нагрівання й охолодження інклінометра в робочому діапазоні температур прилад не змінює свого просторового положення.

Мета корисної моделі досягається тим, що спосіб настроювання інклінометра на базі трикоординатного вимірника прискорення сили тяжіння і трикоординатного вимірника напруженості магнітного поля включає відомі операції, такі ж, як і в прототипі, а саме: установлення інклінометра уздовж заданих напрямків у робочому діапазоні

температур, визначення параметрів невиваженості осей чутливості первинних вимірників, вимір проекцій в осях чутливості первинних вимірників, обчислення проекції в осях системи координат інклінометра, а також припускає проведення додаткових операцій у порівнянні з прототипом, а саме: 1) інклінометр віссю симетрії встановлюють уздовж довільних, але заздалегідь обраних напрямків, число яких не менше двох, і послідовно задають вимірювальні положення шляхом обертання приладу навколо осі симетрії під фіксованими кутами з числом різних значень кутів повороту не менше двох на кожному напрямку; 2) визначають параметри невиваженості осей чутливості разом з каліброваними параметрами чутливих елементів і параметрами впливу магнітних полів-перешкод і взаємного впливу первинних вимірників магнітного поля; 3) інклінометр встановлюють послідовно віссю симетрії уздовж довільно заданих двох напрямків; 4) визначають зміну розрахункових значень в осях системи координат інклінометра в робочому діапазоні температур; 5) обчислюють проекції $u_i (i=x,y,z)$ вектора прискорення сили тяжіння, а також вектора напруженості магнітного поля в осях системи координат інклінометра по вимірах U_x , U_y , U_z в осях чутливості первинних вимірників і температури t усередині інклінометра

$$u_i = K(t)\tilde{u}_i + u_{i0}(t),$$

де $K(t)$, $u_{i0}(t)$ - масштабний коефіцієнт і постійна складова розрахункових значень для поточної температури,

$$\tilde{u}_i = k_{i1}U_x + k_{i2}U_y + k_{i3}U_z + k_{i0},$$

де k_{i0} , k_{i1} , k_{i2} , k_{i3} - параметри, знайдені при температурі настроювання інклінометра.

У загальному вигляді вирази для проекцій прискорення сили тяжіння і напруженості магнітного поля Землі у взаємно перпендикулярних осях інклінометра мають вигляд

$$\begin{bmatrix} \tilde{a}_{xc} \\ \tilde{a}_{yc} \\ \tilde{a}_{zc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{x0} \\ a_{y0} \\ a_{z0} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{r}_{xc} \\ \tilde{r}_{yc} \\ \tilde{r}_{zc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_{x0} \\ r_{y0} \\ r_{z0} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де компоненти \tilde{a}_{xc} , \tilde{a}_{yc} , \tilde{a}_{zc} і \tilde{r}_{xc} , \tilde{r}_{yc} , \tilde{r}_{zc} - проекції прискорення сили тяжіння і напруженості магнітного поля Землі у взаємно перпендикулярних осях системи координат $ox_cy_cz_c$, зв'язаної з інклінометром, при температурі настроювання. Вони розраховуються по вихідних сигналах компонентних датчиків прискорення A_x , A_y , A_z , компонентних перетворювачів магнітного поля R_x , R_y , R_z і поправках $f_{ij} (i,j = 1 \dots 3 \dots 3)$, a_{x0} , a_{y0} , a_{z0} , $m_{ij} (i,j = 1 \dots 3)$, r_{x0} , r_{y0} , r_{z0} , що враховують реальні характеристики датчиків (нерівність коефіцієнтів передачі і наявність електричних нульових зміщень у вихідних сигналах, перекосами осей чутливості первинних вимірників

щодо корпусів і кріплень), геометричні похибки їхньої установки в кутомірний модуль (перекося місць кріплення первинних вимірників щодо напрямків системи координат інклінометра $ox_c y_c z_c$), вплив магнітних полів-перешкод на перетворювачі магнітного поля і взаємний вплив магнітних перетворювачів.

Значення проєкцій прискорення сили тяжіння у взаємно перпендикулярних осях інклінометра $ox_c y_c z_c$ робочому діапазоні температур можна представити як

$$\begin{bmatrix} a_{xc} \\ a_{yc} \\ a_{zc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x(t) & 0 & 0 \\ 0 & k_y(t) & 0 \\ 0 & 0 & k_z(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{a}_{xc} \\ \tilde{a}_{yc} \\ \tilde{a}_{zc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{x0}(t) \\ a_{y0}(t) \\ a_{z0}(t) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де:

$$\begin{bmatrix} \tilde{a}_{xc} \\ \tilde{a}_{yc} \\ \tilde{a}_{zc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{x0} \\ a_{y0} \\ a_{z0} \end{bmatrix},$$

а $k_x(t)$, $k_y(t)$, $k_z(t)$, $a_{x0}(t)$, $a_{y0}(t)$, $a_{z0}(t)$ - коефіцієнти перетворення і нульові зміщення каналів перетворення прискорення, що запам'ятовуються чи представляються аналітично як функції температури.

Проекції напруженості магнітного поля Землі, що обчислюються по вимірах феромодуляційних перетворювачів (ферозондів) з відпаленими пермалоевими осердями, практично не мають дрейфу при дії температур ($0 \dots 200^\circ\text{C}$) і не потребують корекції. При вимірах напруженості магнітного поля перетворювачами, що мають дрейф вихідного сигналу в діапазоні температур експлуатації, обчислення проводяться за аналогією з залежностями (3), а саме

$$\begin{bmatrix} r_{xc} \\ r_{yc} \\ r_{zc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{rx}(t) & 0 & 0 \\ 0 & k_{ry}(t) & 0 \\ 0 & 0 & k_{rz}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{r}_{xc} \\ \tilde{r}_{yc} \\ \tilde{r}_{zc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_{x0}(t) \\ r_{y0}(t) \\ r_{z0}(t) \end{bmatrix}, \quad (3')$$

$$\begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ax} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ay} & 0 \\ 0 & 0 & K_{az} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha_{ax} \cos \beta_{ax} & \sin \beta_{ax} & -\sin \alpha_{ax} \cos \beta_{ax} \\ -\sin \beta_{ay} & \cos \alpha_{ay} \cos \beta_{ay} & \sin \alpha_{ay} \cos \beta_{ay} \\ \sin \beta_{az} & -\sin \alpha_{az} \cos \beta_{az} & \cos \alpha_{az} \cos \beta_{az} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{xc} \\ a_{yc} \\ a_{zc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{x0} \\ A_{y0} \\ A_{z0} \end{bmatrix}$$

де a_{xc} , a_{yc} , a_{zc} - проєкції прискорення сили тяжіння, що діють по осях системи координат інклінометра $ox_c y_c z_c$.

$$\begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ax} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ay} & 0 \\ 0 & 0 & K_{az} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \beta_{ax} & -\alpha_{ax} \\ -\beta_{ay} & 1 & \alpha_{ay} \\ \beta_{az} & -\alpha_{az} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{xc} \\ a_{yc} \\ a_{zc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{x0} \\ A_{y0} \\ A_{z0} \end{bmatrix}$$

Система рівнянь вирішується відносно невідомих проєкцій прискорення сили тяжіння по

де

$$\begin{bmatrix} \tilde{r}_{xc} \\ \tilde{r}_{yc} \\ \tilde{r}_{zc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_{x0} \\ r_{y0} \\ r_{z0} \end{bmatrix},$$

Обчислені значення компонентів використовуються для розрахунку кутів орієнтації свердловини чи приладу по відомих залежностях. З метою контролю працездатності приладу і контролю вірогідності результатів виміру, паралельно з обчисленням кутів орієнтації наземним устаткуванням обчислюються модулі векторів і кут між ними (магнітний нахил - величина відома для району експлуатації) [1].

Величина виправлень індивідуальна для кожного приладу і визначається наступними факторами.

Нехай система координат $ox_c y_c z_c$, вісь oz_c якої спрямована по осі симетрії інклінометра, а дві інші лежать у площині, перпендикулярній до осі симетрії, є базовою (будівельною) системою приладу, по осях якої і повинні бути закріплені осі чутливості первинних вимірників; акселерометрів і магнітометрів.

Оскільки поворот датчика навколо осі чутливості не приводить до спотворення сигналу, задано двома кутами α і β можливу орієнтацію осі чутливості кожного компонентного вимірника щодо системи координат $ox_c y_c z_c$.

На фігурі показана можлива орієнтація осей чутливості первинних вимірників щодо базової системи координат, що враховує геометричні погрішності виготовлення посадкових місць під первинні вимірники і невідповідність напрямку осей щодо корпусів вимірників. Вирази для вихідних сигналів акселерометрів A_x , A_y , A_z , що враховують ці перекося осей чутливості щодо базової системи координат, а також індивідуальність коефіцієнтів передачі K_{ax} , K_{ay} , K_{az} і нульових сигналів A_{x0} , A_{y0} , A_{z0} , мають вигляд

Оскільки на практиці кути α і $\beta \ll 1$, то з точністю до членів першого порядку меншості вираз набуде такого вигляду

вимірах компонентів, що мають обговорені вище похибки. Розв'язок представимо у вигляді

$$\begin{bmatrix} \tilde{a}_{xc} \\ \tilde{a}_{yc} \\ \tilde{a}_{zc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{x0} \\ a_{y0} \\ a_{z0} \end{bmatrix}, (4)$$

де:

$$\begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ax} & \beta_{ax}K_{ax} & -\alpha_{ax}K_{ax} \\ -\beta_{ay}K_{ay} & K_{ay} & \alpha_{ay}K_{ay} \\ \beta_{az}K_{az} & -\alpha_{az}K_{az} & K_{az} \end{bmatrix}^{-1},$$

$$\begin{bmatrix} a_{x0} \\ a_{y0} \\ a_{z0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ax} & \beta_{ax}K_{ax} & -\alpha_{ax}K_{ax} \\ -\alpha_{ay}K_{ay} & K_{ay} & \beta_{ay}K_{ay} \\ \beta_{az}K_{az} & -\alpha_{az}K_{az} & K_{az} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_{x0} \\ A_{y0} \\ A_{z0} \end{bmatrix}.$$

Як впливає з (4), величина всіх коефіцієнтів визначається множниками типу K_i і A_i , що мають різні значення при різних температурах, що є характерним для будь-якого типу акселерометрів.

$$\begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{rx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ry} & 0 \\ 0 & 0 & K_{rz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha_{rx} \cos \beta_{rx} & \sin \beta_{rx} & -\sin \alpha_{rx} \cos \beta_{rx} \\ -\sin \beta_{rx} & \cos \alpha_{ry} \cos \beta_{ry} & -\sin \alpha_{ry} \cos \beta_{ry} \\ \sin \beta_{rx} & -\sin \alpha_{rz} \cos \beta_{rz} & \cos \alpha_{rz} \cos \beta_{rz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r'_{xc} \\ r'_{yc} \\ r'_{zc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{x0} \\ R_{y0} \\ R_{z0} \end{bmatrix}$$

де r'_{xc} , r'_{yc} , r'_{zc} - проекції вектора напруженості сумарного магнітного поля Землі і поля перешкод, що діють по осях системи координат інклінометра $ox_c y_c z_c$.

Вирази для зв'язку проекцій напруженості магнітного поля Землі r_{xc} , r_{yc} , r_{zc} із проекціями r'_{xc} , r'_{yc} , r'_{zc} описані в літературі [3]. Вони мають вигляд

$$\begin{bmatrix} r'_{xc} \\ r'_{yc} \\ r'_{zc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{xc} \\ r_{yc} \\ r_{zc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} q_{11}^* & q_{12}^* & q_{13}^* \\ q_{21}^* & q_{22}^* & q_{23}^* \\ q_{31}^* & q_{32}^* & q_{33}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{xc} \\ r_{yc} \\ r_{zc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} q_{x0} \\ q_{y0} \\ q_{z0} \end{bmatrix}$$

чи при $q_{11} = q_{11}^* + 1, q_{22} = q_{22}^* + 1, q_{33} = q_{33}^* + 1$

$$\begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{rx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ry} & 0 \\ 0 & 0 & K_{rz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \beta_{rx} & -\alpha_{rx} \\ -\beta_{ry} & 1 & \alpha_{ry} \\ \beta_{rz} & -\alpha_{rz} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{xc} \\ r_{yc} \\ r_{zc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} q_{x0} \\ q_{y0} \\ q_{z0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{x0} \\ R_{y0} \\ R_{z0} \end{bmatrix}$$

чи

$$\begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{xc} \\ r_{yc} \\ r_{zc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{x0}^* \\ R_{y0}^* \\ R_{z0}^* \end{bmatrix},$$

де:

$$\begin{aligned} n_{11} &= K_{rx}(q_{11} + q_{21}\beta_{rx} - q_{31}\alpha_{rx}); \\ n_{12} &= K_{rx}(q_{12} + q_{22}\beta_{rx} - q_{32}\alpha_{rx}); \\ n_{13} &= K_{rx}(q_{13} + q_{23}\beta_{rx} - q_{33}\alpha_{rx}); \\ n_{21} &= K_{ry}(-q_{11}\beta_{ry} + q_{21} + q_{31}\alpha_{ry}); \\ n_{22} &= K_{ry}(-q_{12}\beta_{ry} + q_{22} + q_{32}\alpha_{ry}); \\ n_{23} &= K_{ry}(-q_{13}\beta_{ry} + q_{23} + q_{33}\alpha_{ry}); \end{aligned}$$

Отже, і проекції a_{xc} , a_{yc} , a_{zc} , що розраховуються, залежать від температури.

Облік перекосів осей чутливості при розрахунку проекцій справедливий тільки для температури, при якій були знайдені ці перекося. З огляду на цей факт, проекції, що справедливі для однієї конкретної температури, позначені: \tilde{a}_{xc} , \tilde{a}_{yc} , \tilde{a}_{zc} .

Вирази для вихідних сигналів перетворювачів магнітного поля R_x , R_y , R_z , що враховують розбіжність орієнтації їхніх осей чутливості з базовою системою координат, індивідуальність коефіцієнтів передачі K_{rx} , K_{ry} , і K_{rz} , нульових сигналів R_{x0} , R_{y0} , і R_{z0} , за аналогією запишемо у вигляді

$$\begin{bmatrix} r'_{xc} \\ r'_{yc} \\ r'_{zc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{xc} \\ r_{yc} \\ r_{zc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} q_{x0} \\ q_{y0} \\ q_{z0} \end{bmatrix}, (5)$$

де: $q_{ij}, i, j = 1 \dots 3$ - параметри, що визначають спотворення проекцій вектора напруженості магнітного поля Землі «м'яким у магнітному відношенні» залізом елементів конструкції інклінометра і перехресних зв'язків між перетворювачами магнітного поля; q_{x0} , q_{y0} , q_{z0} - проекції постійного магнетизму («твердого в магнітному відношенні заліза») елементів конструкції інклінометра.

Якщо вираз (5) підставити в залежності для вихідних сигналів перетворювачів магнітного поля, то, з урахуванням α і $\beta \ll 1$, маємо

$$\begin{aligned} n_{31} &= K_{rz}(-q_{11}\beta_{rz} + q_{21}\alpha_{rz} + q_{31}); \\ n_{32} &= K_{rz}(q_{12}\beta_{rz} - q_{22}\alpha_{rz} + q_{32}); \\ n_{33} &= K_{rz}(q_{13}\beta_{rz} - q_{23}\alpha_{rz} + q_{33}); \\ R_{x0}^* &= K_{rx}(q_{x0} + q_{y0}\beta_{rx} - q_{z0}\alpha_{rx}) + R_{x0}; \\ R_{y0}^* &= K_{ry}(-q_{x0}\alpha_{ry} + q_{y0} + q_{z0}\beta_{ru}) + R_{y0}; \\ R_{z0}^* &= K_{rz}(q_{x0}\beta_{rz} - q_{y0}\alpha_{rz} + q_{z0}) + R_{z0}. \end{aligned}$$

Система рівнянь вирішується відносно невідомих проекцій напруженості магнітного поля Землі по вимірах компонентних перетворювачів магнітного поля, що мають обговорені вище похибки, і в умовах магнітних перешкод. Розв'язок має вигляд

$$\begin{bmatrix} r_{xc} \\ r_{yc} \\ r_{zc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_{x0} \\ r_{y0} \\ r_{z0} \end{bmatrix},$$

де:

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} \end{bmatrix}^{-1},$$

$$\begin{bmatrix} r_{x0} \\ r_{y0} \\ r_{z0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} R_{x0}^* \\ R_{y0}^* \\ R_{z0}^* \end{bmatrix}.$$

При наявності залежностей характеристик перетворювачів магнітного поля від температури, вирази (6) можна представити аналогічно (4)

$$\begin{bmatrix} \tilde{r}_{xc} \\ \tilde{r}_{yc} \\ \tilde{r}_{zc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_{x0} \\ r_{y0} \\ r_{z0} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{a}_{x0} \\ \hat{f}_{11} \\ \hat{f}_{12} \\ \hat{f}_{13} \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ A_{x1} & A_{x2} & \dots & A_{xN} \\ A_{y1} & A_{y2} & \dots & A_{yN} \\ A_{z1} & A_{z2} & \dots & A_{zN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & A_{x1} & A_{y1} & A_{z1} \\ 1 & A_{x2} & A_{y2} & A_{z2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & A_{xN} & A_{yN} & A_{zN} \end{bmatrix} \right\}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ A_{x1} & A_{x2} & \dots & A_{xN} \\ A_{y1} & A_{y2} & \dots & A_{yN} \\ A_{z1} & A_{z2} & \dots & A_{zN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{a}_{xc1} \\ \tilde{a}_{xc2} \\ \dots \\ \tilde{a}_{xcN} \end{bmatrix}$$

де: $\hat{f}_{11}, \hat{f}_{12}, \hat{f}_{13}, \hat{a}_{x0}$ - оцінки відповідних коефіцієнтів $f_{11}, f_{12}, f_{13}, a_{x0}$; A_{i1}, A_{i2}, A_{iN} ($i = x, y, z$) - вихідні сигнали акселерометрів у 1, 2, ..., N положеннях приладу; $\tilde{a}_{xc1}, \tilde{a}_{xc2}, \tilde{a}_{xcN}$ - відомі значення проекції вектора прискорення сили тяжіння в цих же 1, 2, ..., N положеннях приладу.

Для визначення всіх 24 коефіцієнтів (12 для компонентів вектора прискорення сили тяжіння і 12 для компонентів вектора напруженості магнітного поля Землі) вирішуються ще 5 аналогічних систем. Необхідний мінімум вимірів N - чотири. Однак, у реальних умовах, виміри проводяться з кінцевою точністю, мають випадкову складову помилки виміру і проводяться в просторових положеннях, заданих також з кінцевою точністю. Тому, виміри виконують більше чотирьох.

Розрахункові значення a_{i0} і η_0 будь-якої складової a_i чи η для двох різних просторових положень інклінометра в робочому діапазоні температур можна представити у вигляді

$$a_{ip1} = K(t)a_{i1} + a_{i0}(t),$$

$$a_{ip2} = K(t)a_{i2} + a_{i0}(t).$$

Оскільки після введення поправок, згідно (4) і (6), при температурі настроювання інклінометра виконується умова $K(t)=1$, $a_{i0}(t)=0$, то розрахункові значення a_{ip} (при температурі настроювання) відповідають дійсним проекціям a_i у процесі нагрівання-охолодження приладу в робочому діапазоні температур.

Відповідно до отриманих виразів (4) і (6), у процесі настроювання інклінометра необхідно визначити значення чотирьох поправкових коефіцієнтів для кожного каналу розрахунку відповідних проекцій.

Визначення поправкових коефіцієнтів стосується задач параметричної ідентифікації, для яких розроблені ефективні алгоритми розрахунку. На прикладі одного рівняння з двох систем, вирішимо задачу класичним методом рівнянь Гаусса, на основі якого розроблені як пакетні, так і рекурентні алгоритми ідентифікації.

Відповідно до системи (4), перше рівняння має вигляд

$$\tilde{a}_{xc} = f_{11}A_x + f_{12}A_y + f_{13}A_z + a_{x0}.$$

Опускаючи проміжні викладення, запишемо вирази для знаходження коефіцієнтів $f_{11}, f_{12}, f_{13}, a_{x0}$

Нагріваючи і охолоджуючи в робочому діапазоні температур інклінометр у двох різних просторових положеннях, запам'ятовуємо поточну температуру і значення проекцій, розрахованих по залежностях (4) і (6). По масивах значень визначаємо величини K_i і a_{i0} як функції температури, а саме

$$K(t) = \frac{a_{ip1} - a_{ip2}}{a_{i1} - a_{i2}},$$

$$a_{i0}(t) = \frac{a_{ip1}(t) + a_{ip2} - (a_{i1} + a_{i2})K(t)}{2},$$

де a_{i1}, a_{i2} - розраховані значення проекцій при температурі, рівній температурі настроювання інклінометра, що входить у робочий діапазон температур; a_{ip1}, a_{ip2} - розраховані значення проекцій при поточній температурі робочого діапазону в процесі нагрівання й охолодження.

Розраховані значення K_i і a_{i0} можна зберігати в пам'яті як дискретний масив з визначеним кроком по температурі чи апроксимувати аналітичною функцією.

У процесі розрахунку проекцій прискорення сили тяжіння і напруженості магнітного поля потрібно одночасно з виміром проекцій фіксувати температуру усередині інклінометра. Внести поправки у виміри згідно (4) і (6) коефіцієнтами, розрахованими для температури настроювання, і за значеннями температури внести поправки в залежності (3) і (3').

Література:

1. Ковшов Г.Н., Алимбеков Р.И., Жибер А.В. Инклинометры (Основы теории и проектирования). - Уфа: Гилем, 1998. - 380с.

2. Патент Російської Федерації №2085852, кл. G01C25/00, 9/00, 1994.

3. Кожухов В.П., Воронов В.В., Григорьев В.В. Магнитные компасы. - М.: Транспорт. 1960. - 211с.

